

Геология нефти и газа

УДК 550.8.05

РОЛЬ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОФАЦИАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

В.Б. Белозёров

Томский политехнический университет
E-mail: BelozeroVB@hw.tpu.ru

Показана ведущая роль гидродинамического и тектонического факторов в формировании обстановок седиментации терригенных отложений. Представлена последовательность проведения электрофациального анализа осадков континентальной, переходной и морской групп фаций на основе подбора соответствующей седиментационной модели, что способствует объективной интерпретации и пространственному прогнозу фациальных обстановок по данным каротажа скважин.

Ключевые слова:

Фация, фациальная группа, седиментационная обстановка, коллектор.

Key words:

Facies, facies group, sedimentary environment, reservoir.

Электрофациальный анализ, ввиду ограниченного объёма кернового материала при бурении глубоких скважин, является наиболее распространенным видом фациальных исследований в нефтяной геологии. В основу метода положено изучение по данным радиоактивного каротажа – ГК и самопроизвольной поляризации – ПС особенностей распределения гранулометрической неоднородности пласта по разрезу, которая характеризует гидродинамику процесса осадконакопления. Наиболее активно рассматриваемая методика развивалась в 70–90 гг. прошлого столетия за рубежом, где работы по выявлению сложнопостроенных залежей нефти и газа потребовали детального изучения условий формирования нефтеносных терригенных коллекторов [1–6]. В отечественной литературе фундаментальными исследованиями по этому направлению следует считать работы В.С. Муромцева [7].

Проводимые электрофациальные реконструкции последующих лет в основном затрагивали особенности условий формирования нефтегазоносных резервуаров отдельных месторождений [8, 9] и базировались на результатах ранее проведённых исследований.

Значительные успехи в области седиментологии терригенных отложений позволяют существенно повысить эффективность электрофациальных

реконструкций на основе комплексного анализа кернового материала, результатов геофизических исследований скважин и разработанных седиментационных моделей для терригенных отложений континентальной, переходной и морской групп фаций [1, 6].

Учитывая многообразие фациальных обстановок и ограниченное количество генерализованных форм кривых ГК и ПС каротажа, существует определённая последовательность их фациальной интерпретации. Первоначально по ограниченному объёму кернового материала определяется фациальная группа изучаемых отложений (континентальная, переходная, морская) и далее, в соответствии с существующими стандартами форм ПС (ГК) для конкретных обстановок осадконакопления рассматриваемой группы, проводится их фациальная диагностика по данным каротажа скважин. Объективность реконструкций контролируется подбором соответствующей седиментационной модели, отражающей пространственное распределение фациальных обстановок, полученных в результате электрофациального анализа по скважинам. На этапе подбора такой модели проводится тщательное сопоставление генетических признаков конкретных фаций выбранной седиментационной обстановки (осадочные текстуры, аутигенные минералы, органические остатки

и т. д.) с керновым материалом скважин. Такая последовательность изучения позволяет не только объяснить территориальную взаимосвязь обстановок осадконакопления, выявленных бурением, но и способствует прогнозу пространственного развития фаций, не освещённых скважинными данными, но предполагаемых подобранной седиментационной моделью.

Учитывая то, что в основе формирования коллектора лежит процесс перераспределения во времени терригенного материала водной средой, тектонический и гидродинамический факторы контролируют как объёмы поступления обломочного материала в осадочный бассейн, так и образование определённого сообщества фациальных обстановок. Наиболее детально значение этих факторов в формировании песчаных тел изложено в работе [6]. Совместный анализ публикаций по седиментологии терригенных осадков и их электрофациальному анализу позволяет сформировать генерализованные электрофациальные модели пространственного распределения фаций, учитывающие гидродинамику бассейна осадконакопления и особенности его тектонического развития.

Для речных систем континентальной группы фаций можно выделить три основных типа седиментационных обстановок. Первый – разветвлённый (многорусловый) тип рек, свойственен предгорным равнинам, где достаточно сильная гидродинамика речного потока сочетается с большим поступлением терригенного материала. Постоянное изменение положения речных рукавов способствует формированию покровного типа аллювия гравийно-песчаного либо песчаного состава, где преобладающей фацией являются песчаники русловых отмелей, а подчинённой – песчаные осадки действующего и глинистые осадки «брошенно-

го» русла. Соответствующие формы кривых ПС рассматриваемых обстановок приведены на рис. 1.

Второй тип – меандрирующие реки равнин, характеризуется повышенным содержанием терригенного материала в сочетании с низкой гидродинамикой текучих вод. Для этого типа рек песчаная составляющая в разрезе и плане, ввиду постоянного формирования и «отчуждения» меандр, развита фрагментарно. Меандрирующим рекам свойственен обширный спектр фаций (береговые валы, кривосовые глифы, прирусловые валы, головные части берегового вала, ленточные гряды, отложения поймы и старицы), территориальное соотношение которых и типы кривых ПС представлены на рис. 2.

В зависимости от направления меандрирования реки в осадочной толще, вмещающей русло, выделяют отложения песчаной и глинистой поймы. На прямолинейных и умеренно меандрирующих участках реки, где транспортирующая способность водного потока соответствует объёму влекомого обломочного материала, латеральное перемещение песчаных осадков осуществляется за счёт мигрирующих во времени «ленточных» гряд [10]. Ключевым фациальным элементом, характеризующим отчуждение меандры с последующим формированием старицы, является головная часть берегового вала. Этот фациальный элемент осложняет боковую часть берегового вала меандры вверх по течению реки.

Третьему – анастазирующему типу рек, свойственно стабильное во времени положение речных рукавов и пойменных долин. В результате этого формируются русловые пески повышенной толщины, заключённые в глинистые осадки поймы, имеющие на каротаже блоковую форму кривой ПС (ГК).

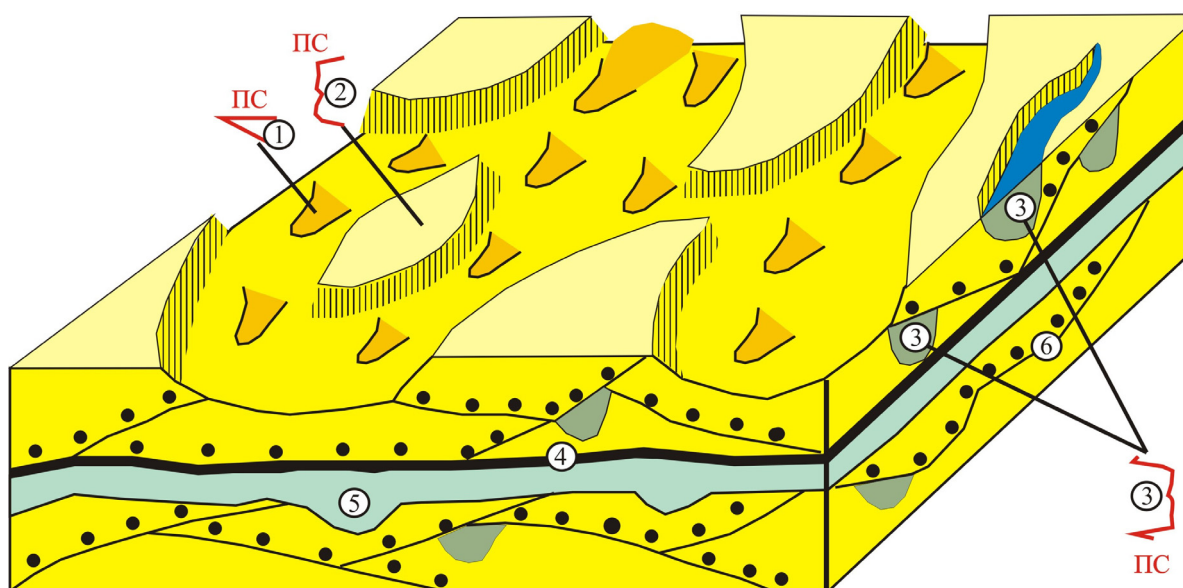


Рис. 1. Фациальная интерпретация кривых ПС для речных отложений разветвлённого типа: 1) песчаные осадки действующего русла; 2) песчаные осадки внутри русловой отмели; 3) глинистые отложения брошенного русла; 4) торфяники (угли); 5) алеврито-глинистые осадки завершающей стадии развития аллювиального ритма; 6) базальные горизонты песчаных толщ

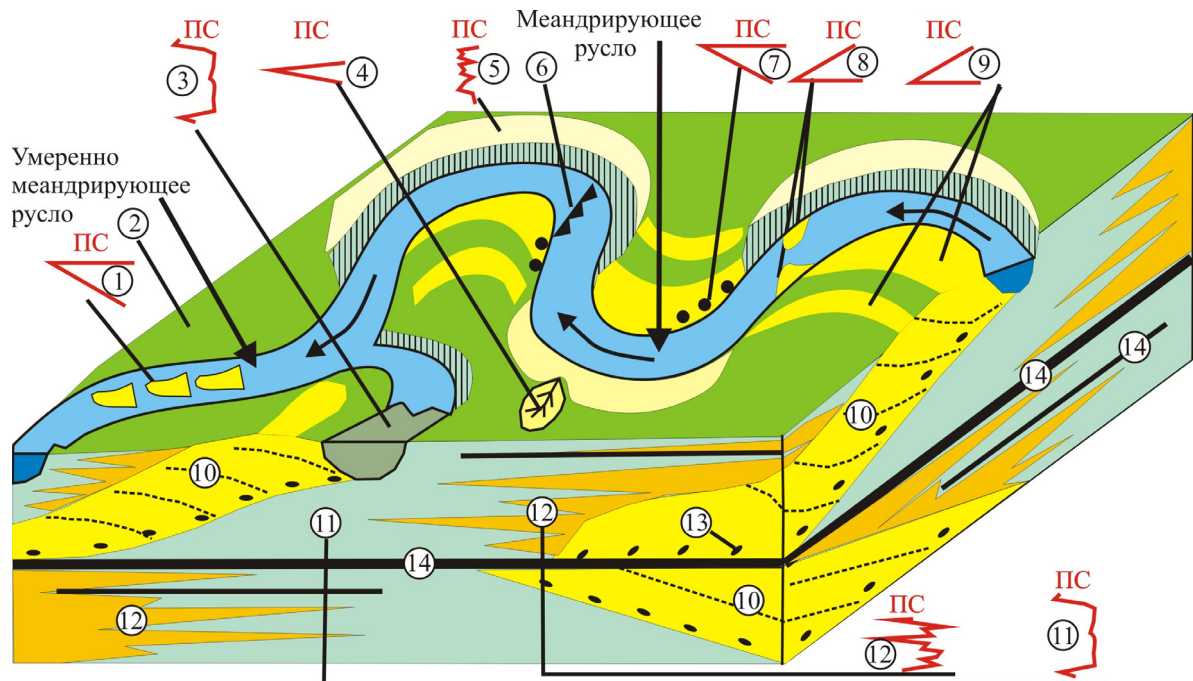


Рис. 2. Фациальная интерпретация кривых ПС для речных отложений меандрирующего типа: 1) ленточная гряда; 2) пойменное болото; 3) старица (брошенное русло); 4) кривассовый глиф; 5) прирусловой вал (пески разлива); 6) перекасты; 7) головная часть берегового вала; 8) побочни; 9) береговые валы кос (меандровые отмели); 10) граница сегментов наращивания песчаной толщи в процессе меандрирования; 11) внутренняя, глинистая часть поймы; 12) внешняя, песчаная часть поймы; 13) базальный горизонт (крупнозернистые песчаники с галькой); 14) торфяники (угли)

Учитывая, что каждой фациальной обстановке осадконакопления рассмотренных речных систем соответствует индивидуальная характеристика кривых ПС (ГК) и определённое пространственное положение в седиментационной модели, открывается возможность по отдельным фациальным элементам, установленным в процессе бурения скважин, спрогнозировать местоположение фациальных обстановок, не выявленных бурением, но предполагаемых в соответствии с выбранной седиментационной моделью.

При интерпретации отложений переходной и морской групп фаций необходимо учитывать этапы тектонического развития осадочного бассейна (трансгрессивный, регрессивный) и гидродинамический режим морского побережья (волновой, приливной, штормовой). Трансгрессии и регрессии влияют как на объёмы поступления обломочного материала в бассейн седиментации, так и на «выразительность» фациальных обстановок в осадочном разрезе. В условиях регрессии, в связи с понижением базиса эрозии, поступление терригенного материала усиливается. Преимущественно медленное развитие регрессий сопровождается последовательным напластованием в разрезе отложений, сформированных в пределах дальней, переходной, предфронтальной и пляжевой зонах морского побережья (рис. 3). Это формирует в покровных, выдержанных по площади регрессивных песчаниках гранулометрическую последовательность с увеличением зернистости вверх по разрезу (воронковидная форма кривой ПС), в которой выде-

ление конкретных фациальных обстановок затруднено.

Последовательность электрофациального анализа в осадочной серии регрессирующего моря сводится к первоначальному делению разреза, если это возможно, на толщи дальней, переходной, предфронтальной и пляжевой зон седиментации с последующей электрофациальной интерпретацией каждой из них в зависимости от принятой седиментационной модели побережья (волновая, штормовая, приливная).

В отличие от регрессии, трансгрессия моря проявляется более активно. В её реализации можно выделить две фазы: фазу активного наступления и фазу относительной стабилизации морского побережья. Вследствие того, что в периоды трансгрессий происходит «консервация» источников сноса, ограниченные объёмы поступающего терригенного материала не способны формировать обширные по площади коллекторы покровного типа, свойственные регрессивным этапам. Накопление повышенных толщин песчаников происходит в фазу тектонической «стабилизации» на конкретных гидродинамических барьерах морского побережья (барьерный бар, бар дальней зоны), в пределах активных гидродинамических зон шельфа (приливно-отливные валы) и приливно-отливной равнины (приливно-отливные каналы, дюны и т.д.). Осадки пляжевых зон незначительны по толщине и играют подчиненную роль.

В фазу активного наступления моря эта фациальная «мозаика» перекрывается более глубоко-

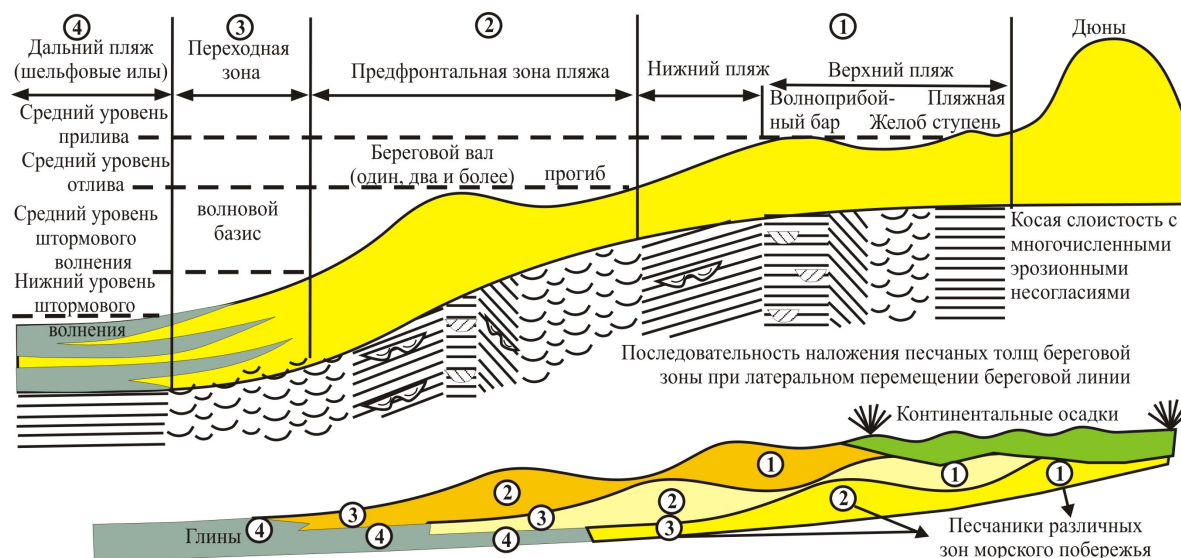


Рис. 3. Схема геоморфологических единиц береговой зоны и соотношение между текстурами донных осадков в прибрежной зоне

водными, преимущественно глинистыми осадками. Для территорий, охваченных активной фазой трансгрессии, характерно накопление плохо отсортированных маломощных песчано-глинистых осадочных толщ, выделяемых в фацию «мобильной седиментации», либо осадки могут вовсе отсутствовать [6].

Пространственное соотношение конкретных фациальных обстановок в условиях стабильного морского побережья (рис. 4) контролируется типом его гидродинамической активности (штормовой, волновой, приливно-отливной), который также предопределяет и тип дельт морского бассейна (приливная, волновая, речная). Так, преимущественно приливно-отливные процессы способны перераспределять терригенный материал на значительные территории как в направлении суши, так и в направлении моря, формируя песчаники покровного типа в пределах пляжа, предфронтальной, переходной зон и коллекторы «шнуркового» типа в области шельфа (приливно-отливные валы) и приливно-отливной равнины (приливно-отливные каналы). Волновые процессы при дефиците обломочного материала благоприятны для образования баров дальней зоны, барьерных баров и лагун. Штормовому побережью свойственно формирование сообщества песчаных баровых построек эрозивно-аккумулятивного типа, приливно-отливных дельт и штормовых песчаников (рис. 5).

Штормовые песчаники являются элементом песчаной составляющей шельфовой зоны, формирование которых связано с участками побережий, подверженных воздействию штормов. Разрушение вдольбереговых баровых построек в условиях сильной гидродинамической активности способствует транспортировке грубообломочного материала на значительное расстояние в удалённые шельфовые участки морского бассейна. Чередование проявлений штормовых периодов со спокойными этапами

седиментации благоприятно для переслаивания хорошо отсортированного песчаного и глинистого материала. Однако глинистые прослои в «штормовых» песчаниках шельфовой зоны не образуют однородную литологическую среду. Это связано с тем, что на сформированный в период спокойной седиментации маломощный глинистый покров оказывает сильное гидродинамическое воздействие последующая штормовая обстановка. При этом глинистый материал «смешивается» с подстилающими его песчаными разностями, образуя песчано-глинистый прослой с волнистой прерывистой («рябчиковой») текстурой. Одна из важных особенностей штормовых песчаников — значительное латеральное развитие отдельных маломощных хорошо отсортированных песчаных прослоев.

Формирование дельт обусловлено деятельностью речных систем, а также приливных и волноприбойных воздействий моря. По доминирующему фактору, контролирующему перераспределение осадков этой переходной группы фаций, выделяют выдвигающиеся, лопастные, серповидные и эстуариевые типы дельт [6].

По последовательности пространственной взаимосвязи седиментационных обстановок в переходной (дельтовой) группе фаций могут быть выделены фации наземной части дельты, авандельты и продельты. Формирование наземной части дельты связано с континентальной равниной, периодически заливаемой водой, где осаждаются как песчаный, так и глинистый материал. Здесь выделяются осадки дельтовых рукавов, лагун и приливно-отливных равнин.

Осадки авандельты отлагаются в прибрежной части моря и представлены в основном песчаными образованиями. Продельта характеризует наиболее удалённую, морскую часть дельтового комплекса, для которой характерно накопление глин и алевролитов.

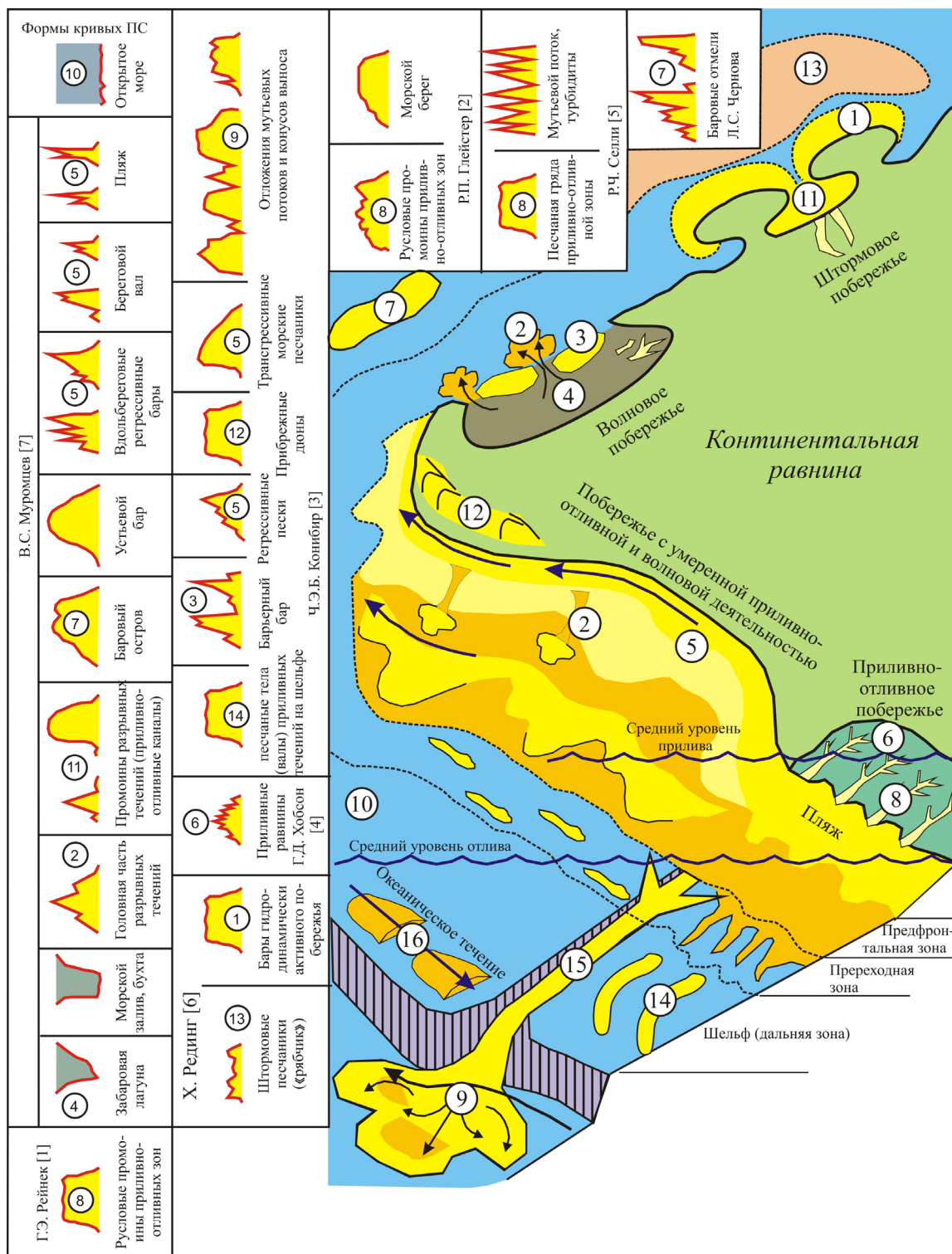


Рис. 4. Фациальная интерпретация кривой ПС для морских отложений: 1) баровый остров; 2) промоины и головные части разрывных течений; 3) барьерный бар; 4) забаровая лагуна; 5) пляж, береговой вал (трансгрессивные и регрессивные береговые пески); 6) приливно-отливная зона с рукавообразной системой русловых промоин; 7) бары дальней зоны и песчаные банки; 8) приливно-отливные каналы и гряды; 9) глубоководный конус выноса; 10) глинистые осадки шельфа; 11) приливно-отливные дельты; 12) дюны; 13) штормовые пески; 14) песчаные валы приливных течений; 15) подводная долина; 16) подводные дюны

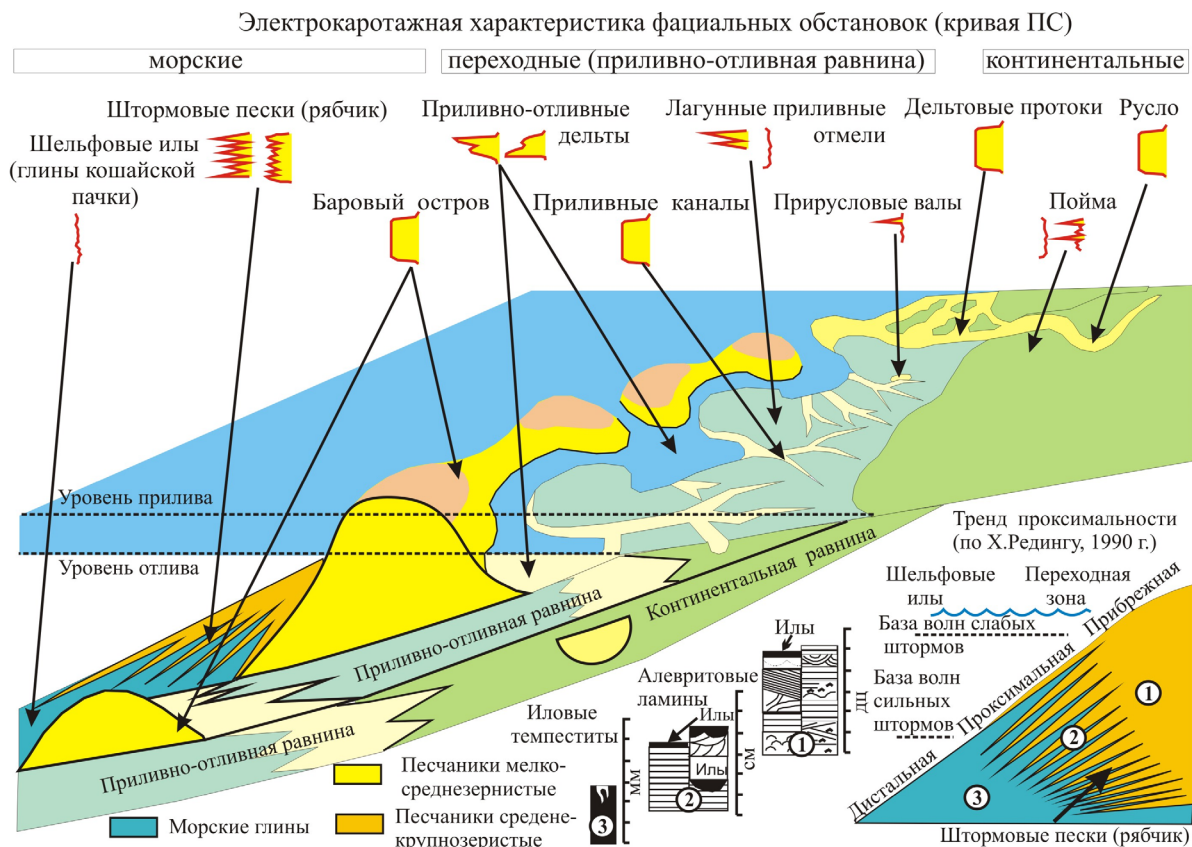


Рис. 5. Седиментационная модель штормового побережья (условия формирования баррем-аптских песчаных пластов группы А₁ Западно-Сибирской низменности)

На рис. 6, а, б, приведён пример конструктивных дельт (выдвигающаяся, лопастная), строение которых обусловлено влиянием русловых процессов на распределение песчаных и глинистых осадков. В выдвигающихся дельтах преобладает влияние русловых процессов, вследствие чего песчаная составляющая локализуется в линейных зонах, приуроченных к действующим дельтовым протокам. В пространстве конфигурация трендов дельтовых протоков напоминает «птичью лапу», и это название часто является синонимом для дельт рассматриваемого типа.

Отличие лопастных дельт от выдвигающихся обусловлено преобладанием волновых процессов в перераспределении терригенного материала при их формировании. Вследствие этого песчаный покров авандельты более обширен. Песчаные «рукава» представляют собой сообщество песчаников русел и устьевых баров. По каротажным диаграммам ПС и ГК собственно дельтовые протоки характеризуются блоковой и колоколовидной формами. Устьевые бары и покровы авандельты имеют воронкообразную конфигурацию кривых ПС и ГК. Отложения между дельтовыми протоками представлены переслаиванием песчаников, алевритов и аргиллитов.

В деструктивных, серповидных (рис. 6, в) и эстуариевых (рис. 6, г) дельтах распределение терригенного материала обусловлено волновой и при-

ливной деятельностью моря. Песчаные покровы авандельты значительны по площади. Для них свойственна воронковидная форма кривых ПС и ГК.

По данным промысловой геофизики фациальная характеристика отложений дельтовых протоков и осадков, разобшающих их, подобна аналогичным отложениям для конструктивных дельт. Отличительная особенность строения эстуариевой авандельты — наличие серии песчаных гряд приливных течений, являющихся «морским» продолжением дельтовых каналов, для которых характерна блоковая форма кривых ПС и ГК.

Для авандельтовых отложений свойственно наличие разрывных и деформационных тектур, связанных с перемещением грубообломочных осадков в процессе седиментации, вследствие поступления избыточного объема терригенного материала в морской бассейн.

Как и для обстановок континентальной группы, каждый из фациальных элементов перечисленных седиментационно-гидродинамических моделей побережья и дельтовых равнин имеет определённое пространственное положение и индивидуальную конфигурацию кривой ПС (ГК). Это позволяет по результатам электрофациального анализа ограниченного числа скважин реконструировать седиментационную модель в целом и, используя существующие знания по особенностям про-

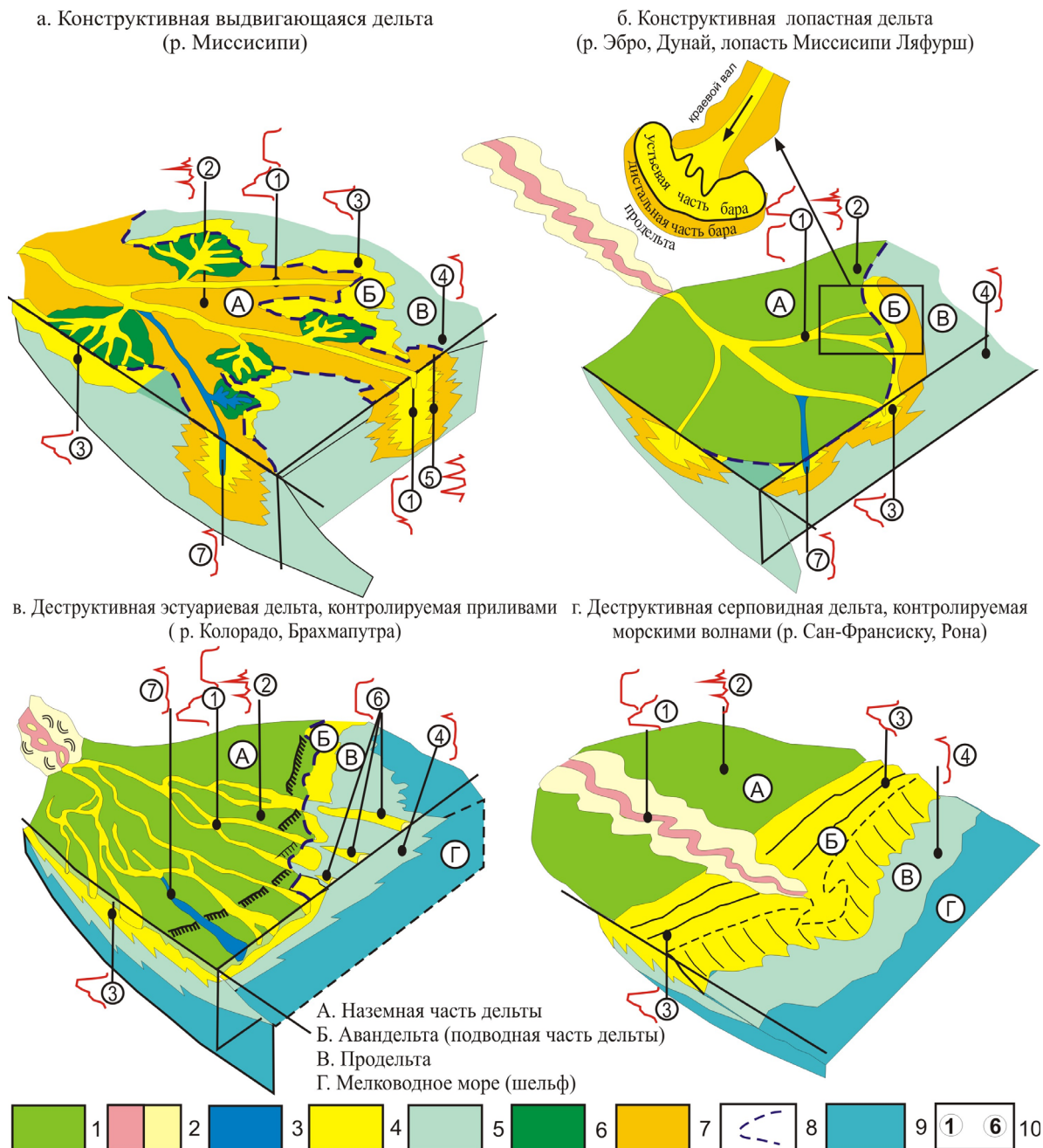


Рис. 6. Фациальная интерпретация кривой ПС для дельтовых отложений: 1) наземная часть дельтовой равнины; 2) песчаные отложения русла реки; 3) глинистые отложения «брошенного» русла; 4) песчаные отложения дельтовых каналов и аванделы; 5) алевритовые отложения удалённой части аванделы (продельта); 6) отложения приморских маршей; 7) периферия дельтовых каналов; 8) линия морского побережья; 9) шельфовые илы; 10) генетическая интерпретация формы кривой ПС (1 – дельтовый канал, протока; 2 – отложения между протоками; 3 – отложения приустьевых баров дельтовых протоков; 4 – отложения продельты; 5 – периферия дельтового канала; 6 – песчаная гряда приливных течений; 7 – брошенное русло дельтовой протоки)

странственного развития и строению фациальных элементов рассматриваемой модели, более эффективно проводить разведку и эксплуатацию нефтегазоносных резервуаров.

Выводы

Повышение эффективности разведки и разработки залежей углеводородов в терригенных кол-

лекторах на основе совместного использования седиментационной модели продуктивного резервуара и электрофациального анализа осадочной толщи предусматривает:

- предварительную диагностику фациальной группы (континентальная, переходная, морская) изучаемого осадочного комплекса на основе керна материала по скважинам;

- интерпретацию обстановок осадконакопления по форме кривых радиоактивного каротажа и самопроизвольной поляризации в соответствии с выбранной фациальной группой;
- подбор наиболее оптимальной седиментационной модели из числа выделяемых в изучаемой фациальной группе пород, удовлетворяющей

наблюдаемому пространственному распределению электрофаций по скважинам;

- территориальный прогноз фациальных обстановок, не выявленных ранее бурением, но предполагаемых в соответствии с выбранной седиментационной моделью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейнек Г.Э., Сингх И.Б. Обстановка терригенного осадконакопления. Пер. с англ. — М.: Недра, 1981. — 438 с.
2. Глестер Р.П., Нельсон Х.У. Роль гранулометрического анализа в определении фаций. Пер. с англ. — М.: Всесоюзный центр перевода, 1976. — № Ц-88456. — 82 с.
3. Конибир Ч.Э.Б. Палеоморфология нефтегазовых песчаных тел. Пер. с англ. — М.: Недра, 1979. — 255 с.
4. Хобсон Г.А. Достижения в нефтяной геологии. Пер. с англ. — М.: Недра, 1980. — 234 с.
5. Селли Р.Ч. Древние обстановки осадконакопления. Пер. с англ. — М.: Недра, 1989. — 93 с.
6. Реддинг Х. Обстановка осадконакопления и фации. — М.: Мир, 1990. — Т. 1. — 350 с.
7. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел литологических ловушек нефти и газа. — Л.: Недра, 1984. — 259 с.
8. Топычанова Е.Б., Ермакова С.А., Зорькина О.А. Особенности геологического строения и условий формирования неоконских отложений на Западе Сургутского свода // Нефтяное хозяйство. — 2009. — № 8. — С. 18–20.
9. Крупин А. А. Анализ развития палеорусловых отложений в юрских горизонтах месторождения Каламкас // Нефть. Газ. Новация. — 2010. — № 10. — С. 60–71.
10. Попов И.В. Загадки речного русла. — Л.: Гидрометеиздат, 1977. — С. 99–103.

Поступила 20.01.2001 г.

УДК 553.98

ВЛИЯНИЕ ФАЦИАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ТЕРРИГЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА РАЗРАБОТКУ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

В.Б. Белозёров

Томский политехнический университет
E-mail: BelozeroVB@hw.tpu.ru

Проведён анализ фильтрационно-емкостной неоднородности песчаных коллекторов с позиции условий их образования. В зависимости от фациальной принадлежности песчанников, выделены фациальная, макрослоистая (гранулометрическая), слоистая (текстурная) и микрослоистая фильтрационно-емкостные неоднородности. Показано участие рассматриваемой совокупности фильтрационно-емкостных неоднородностей коллектора в построении его геологической модели и особенностях разработки залежей нефти и газа. Проведена качественная оценка эффективности существующих методов разработки для каждой из выделенных неоднородностей.

Ключевые слова:

Фация, слоистость, анизотропия, проницаемость, пористость, нефть, газ.

Key words:

Facies, cleavage, anisotropy, permeability, porosity, oil, gas.

Внедрение в нефтегазовую геологию новых технологий, затрагивающих как добычу углеводородного сырья (гидравлический разрыв пласта (ГРП), бурение горизонтальных скважин), так и математическое моделирование процесса разработки залежи, позволяет использовать фильтрационно-емкостную неоднородность пласта в повышении эффективности эксплуатации месторождений нефти и газа [1, 2].

Учитывая, что эффективность эксплуатации связана с реализацией определённой технологической схемы разработки залежи в соответствии с построенной геологической моделью пласта,

предлагается новый подход оценки фильтрационно-емкостной матрицы коллектора. В его основу положены литолого-седиментационные характеристики терригенного пласта, базирующиеся на четырёх типах его фильтрационно-емкостной неоднородности.

Первый тип связан с фациальной неоднородностью формирования коллектора, в результате чего песчаный пласт рассматривается не как единое целое, а как геологическое тело, изменчивое по латерали в соответствии с конкретными обстановками осадконакопления (рис. 1, а). Для каждой из обстановок характерны свои закономерности распреде-